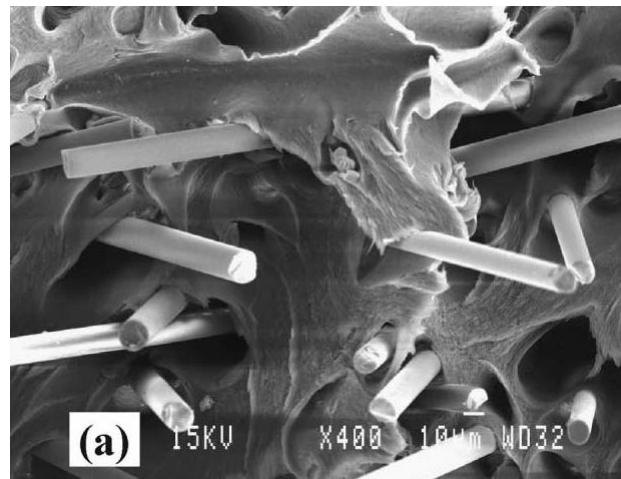
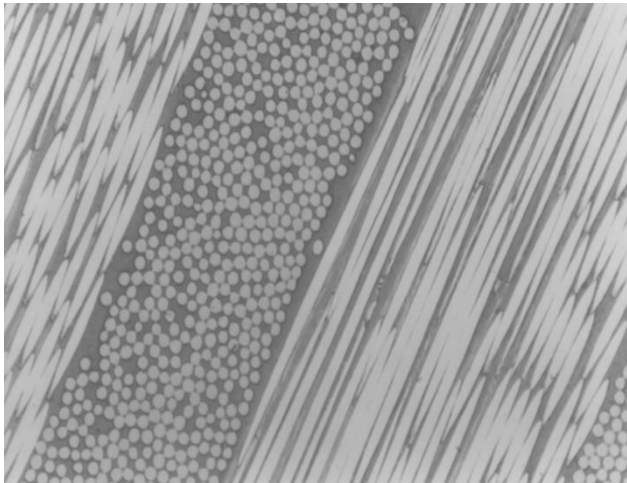


materiais compósitos



ZEM5000

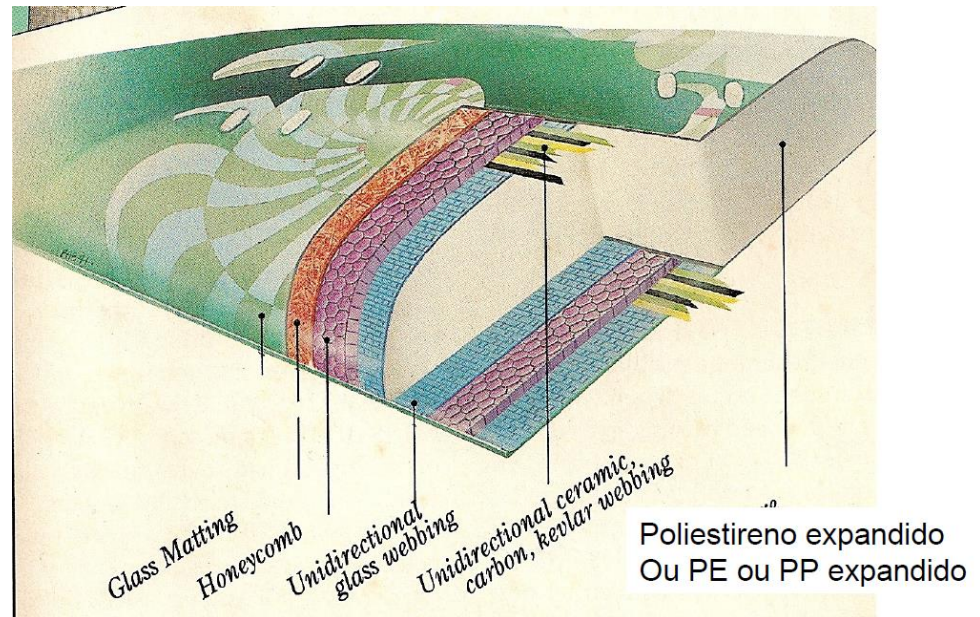
Ciência dos Materiais

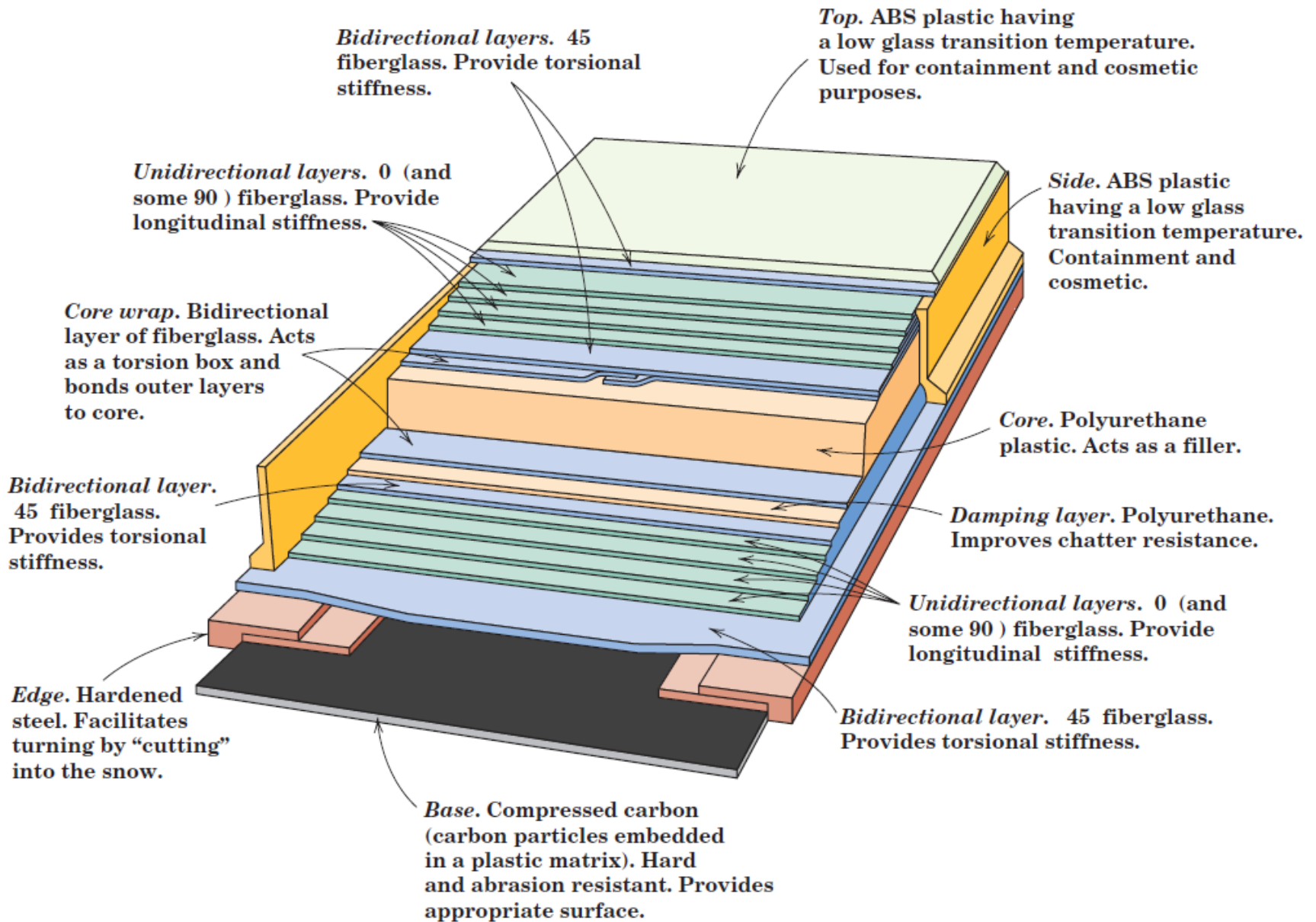
Prof. João Adriano Rossignolo



Compósitos

- **Princípio da ação combinada:** Material multifásico cujas propriedades sejam uma combinação benéfica (**sinergia**) das propriedades das duas ou mais fases que o constituem.





Material compósito no EMB170

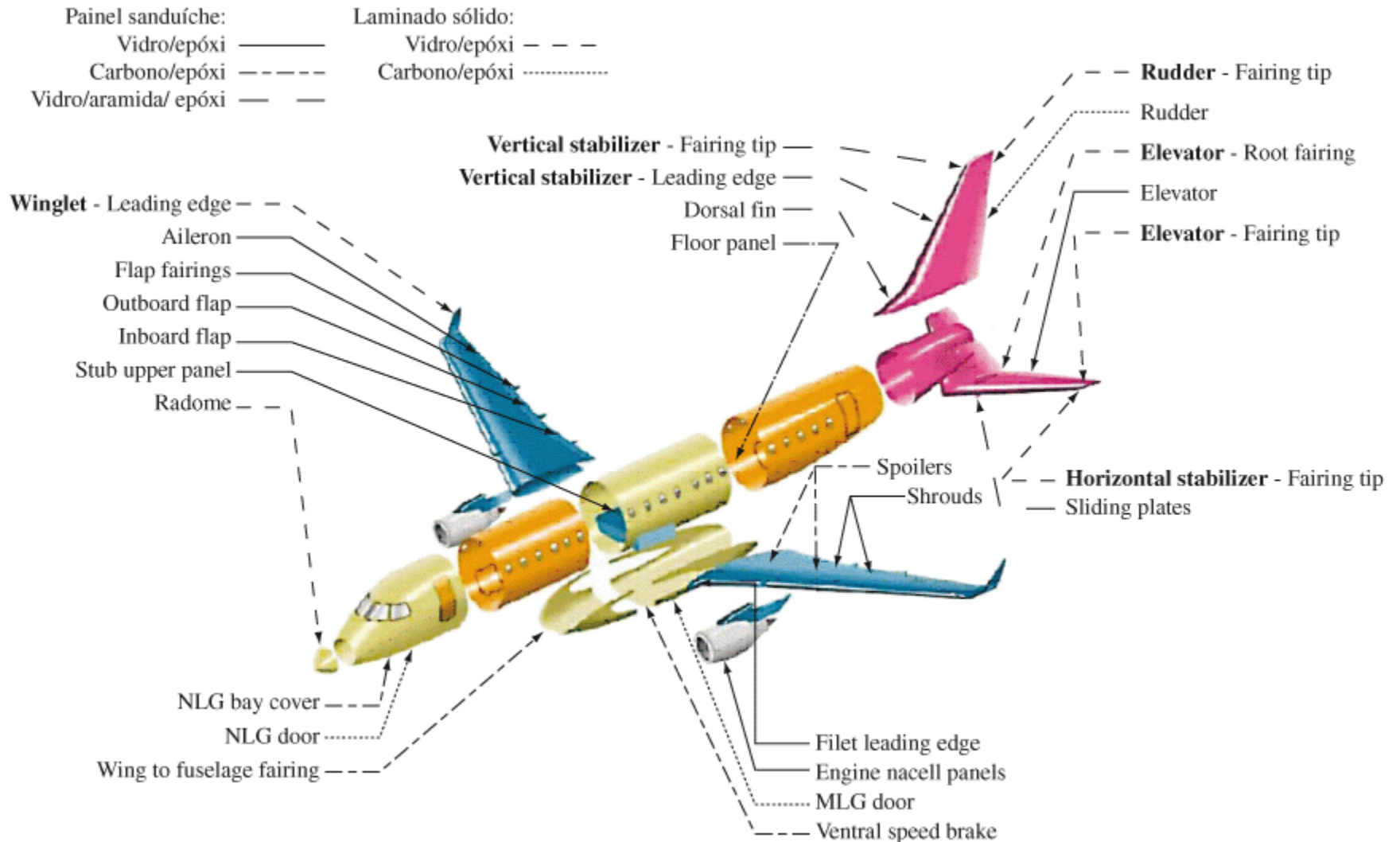


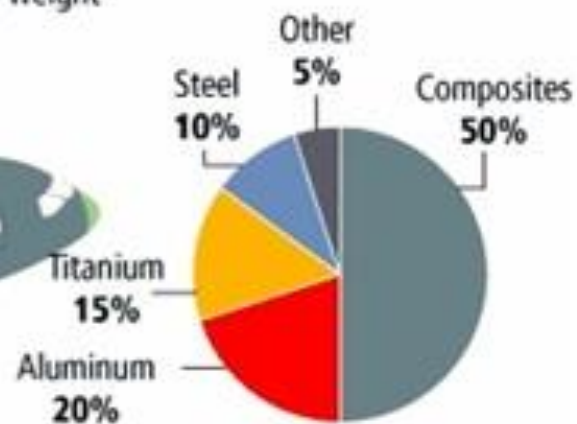
Figura 2. Vista explodida da aeronave EMB-170, mostrando os componentes fabricados em compósitos poliméricos avançados (cortesia da Embraer).

Materials used in 787 body

- Fiberglass
- Aluminum
- Carbon laminate composite
- Carbon sandwich composite
- Aluminum/steel/titanium

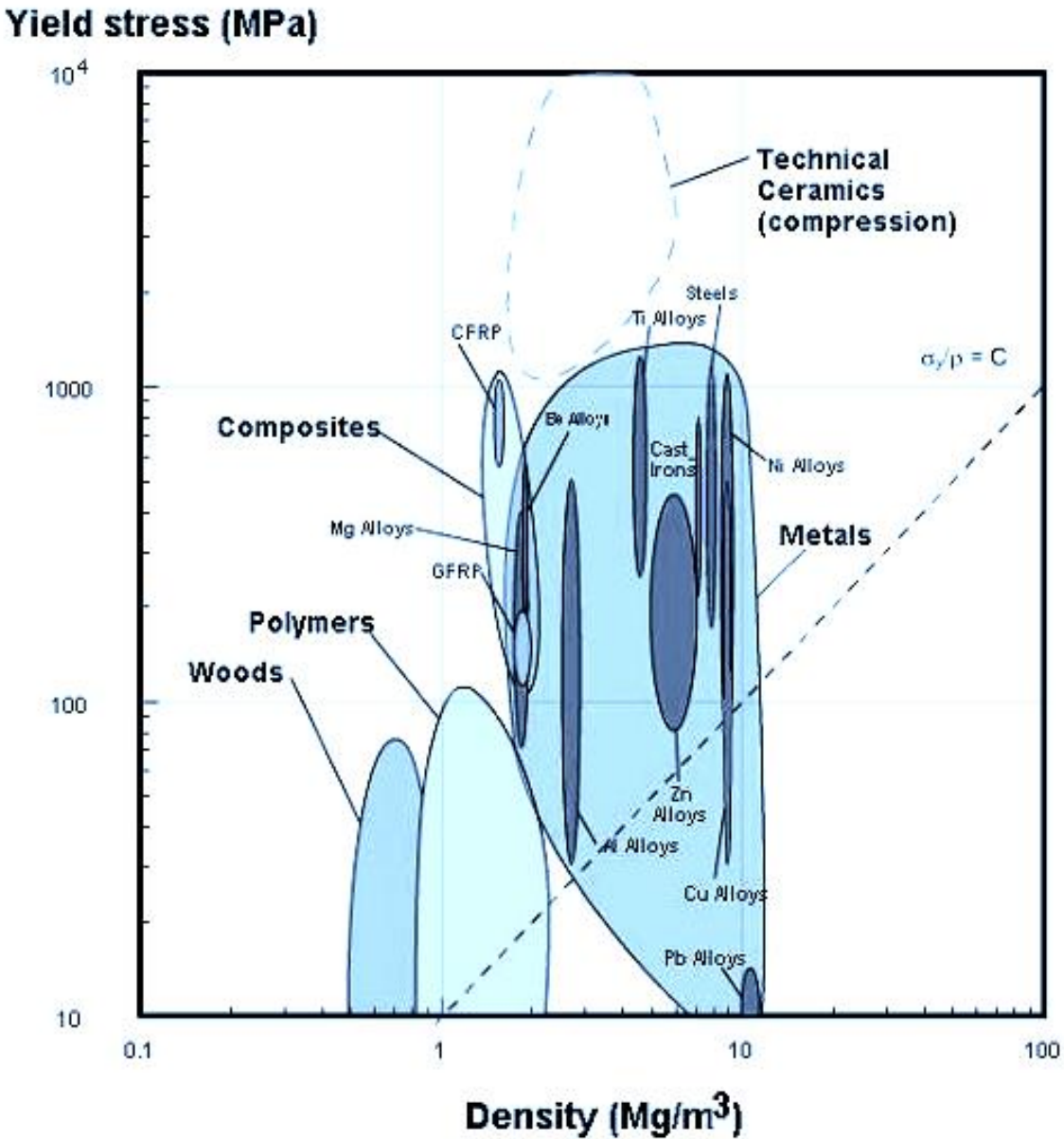


Total materials used By weight



By comparison, the 777 uses 12 percent composites and 50 percent aluminum.

Comparação de Propriedades Mecânicas



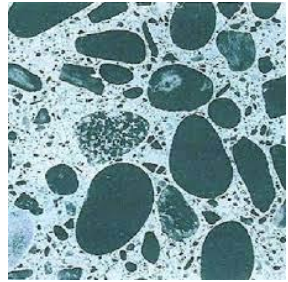
Materiais Compósitos

Definições

Materiais Compósitos: classe de materiais compostos por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço ou modificador), contínua ou não, cujas propriedades são obtidas a partir da combinação das propriedades dos constituintes individuais (regra da mistura).

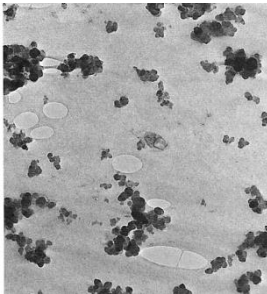
Compósitos funcionais: materiais compósitos cujas propriedades de interesse principal são as propriedades elétricas, térmicas, magnéticas ou ópticas, além da propriedade mecânica.

Compósitos



Reforçado com partículas

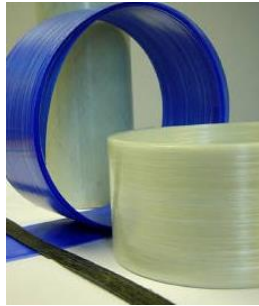
Partículas grandes



Reforçado por dispersão

Reforçado com fibras

Contínuo (alinhado)



Descontínuo (curto)

Alinhado

Orientado aleatoriamente

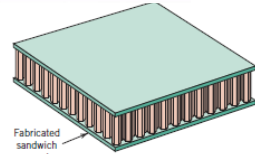


Estrutural

Laminados



Painéis em sanduíche



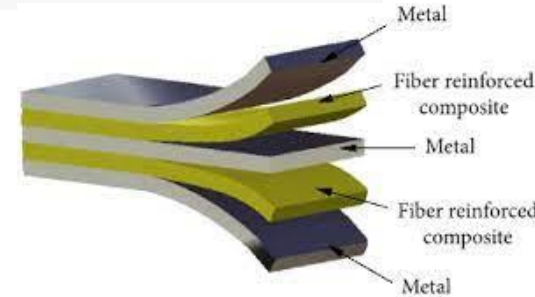
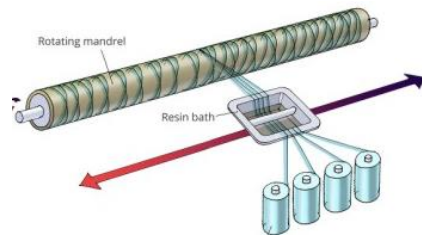
Metal

Fiber reinforced composite

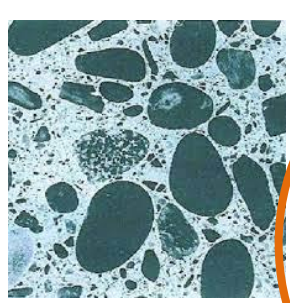
Metal

Fiber reinforced composite

Metal

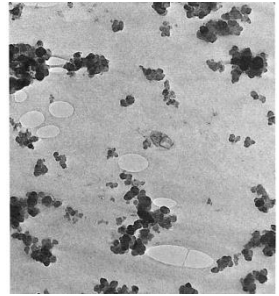


Compósitos



Reforçado com partículas

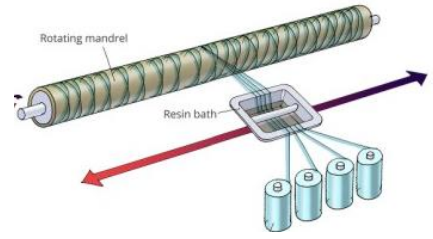
Partículas grandes Reforçado por dispersão



Reforçado com fibras

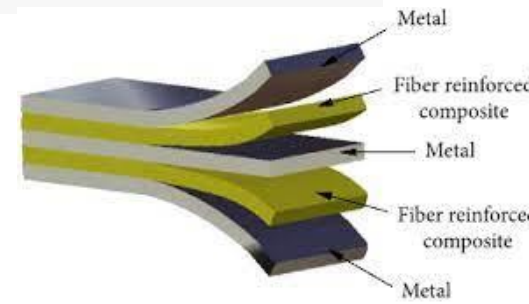
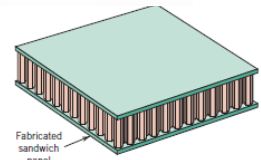
Contínuo (alinhado) Descontínuo (curto)

Alinhado Orientado aleatoriamente



Estrutural

Laminados Painéis em sanduíche



Compósitos reforçados com partículas

Partículas grandes: maiores que $\sim 1\mu\text{m}$

- Matriz transfere parte da carga à fase dispersa

Dispersão: $\sim 0,01$ a $0,1 \mu\text{m}$

- Aumento de resistência se dá por interações a nível atômico ou molecular (assunto do tópico 3).

Compósitos com partículas grandes

Regra das misturas:

- Propriedade dependem das frações volumétricas das fases

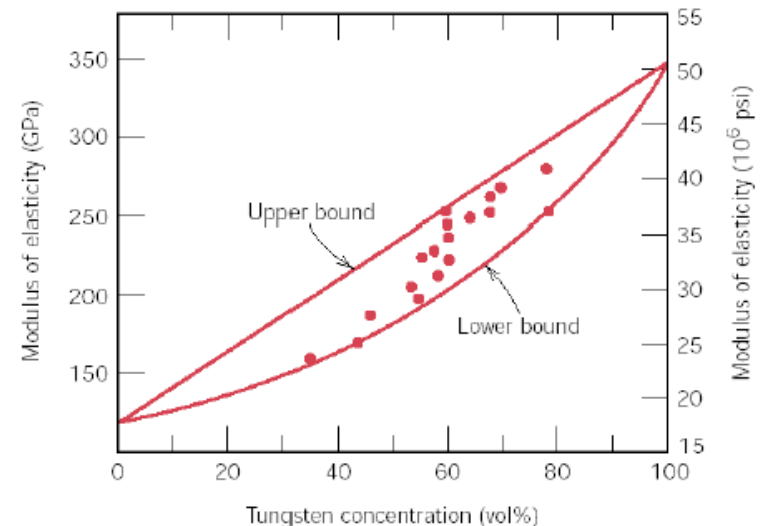
Módulo de elasticidade varia entre

Limite superior $E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p$

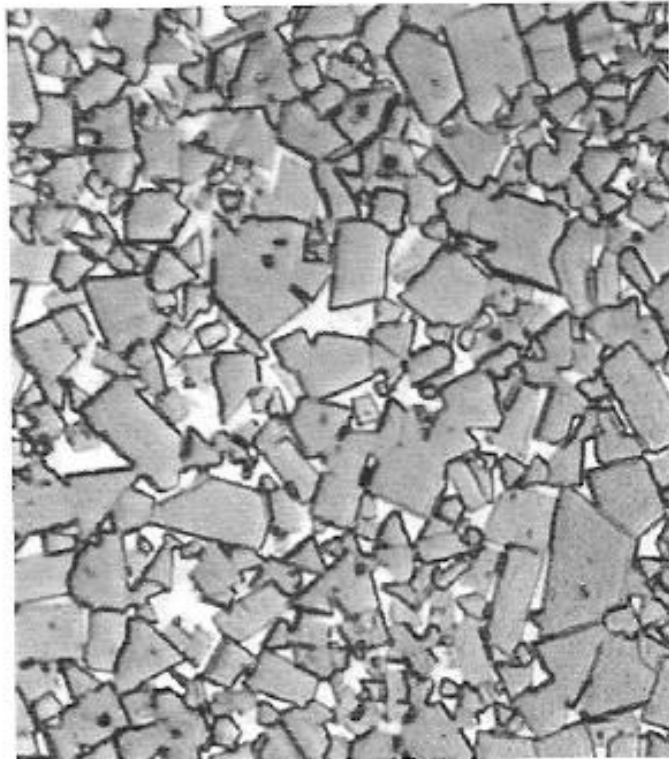
Limite inferior $E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$

Partículas de W
Em cobre:

Existe limite superior
E limite inferior
Para E



Exemplo de MMC: broca de metalduro

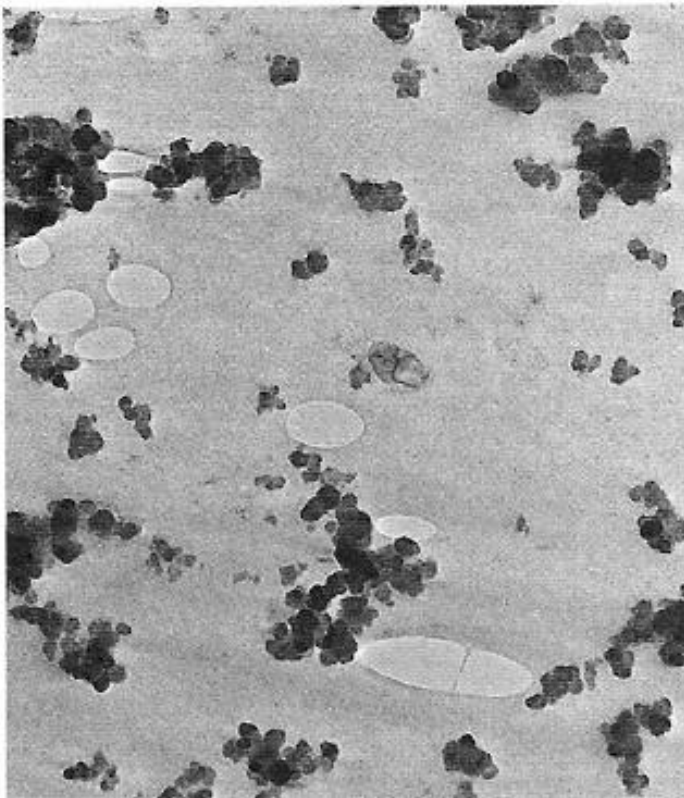


Partículas de WC em matriz de Co

WC confere a dureza e a resistência ao desgaste necessários ao corte de concreto. Cobalto confere tenacidade.

Partículas medem $\sim 10 \mu\text{m}$

Exemplo de PMC: borracha do pneu



Matriz: elastômero
Partículas: negro de fumo (carbono)

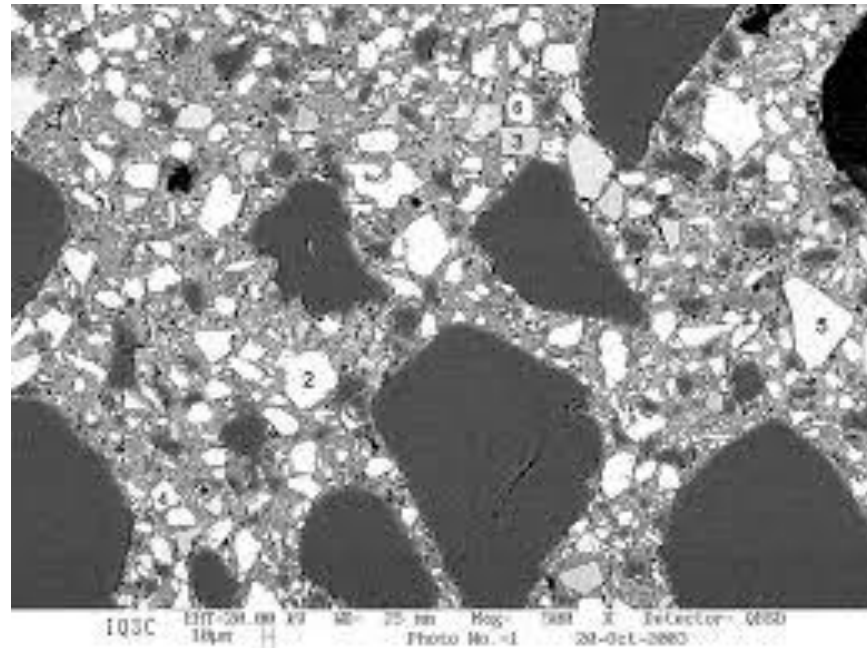
partículas filtram UV
e aumentam resistência mecânica

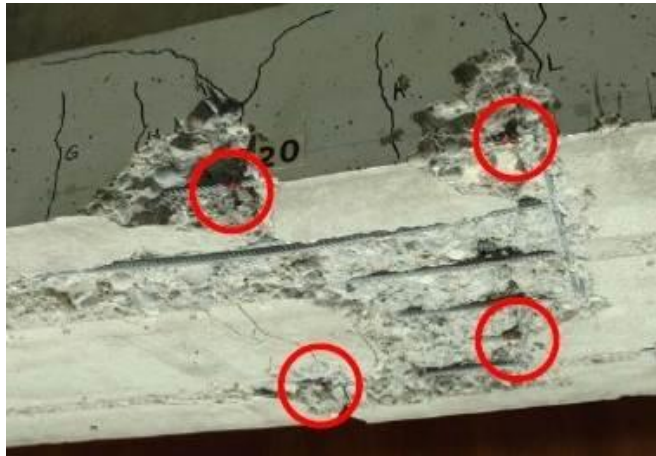
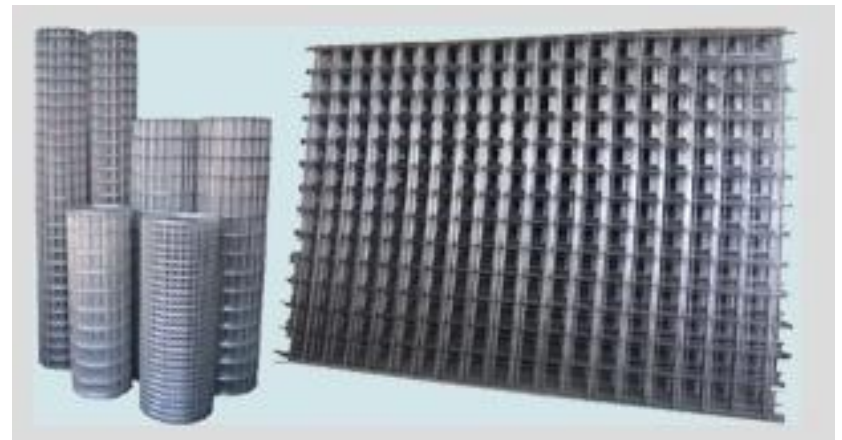
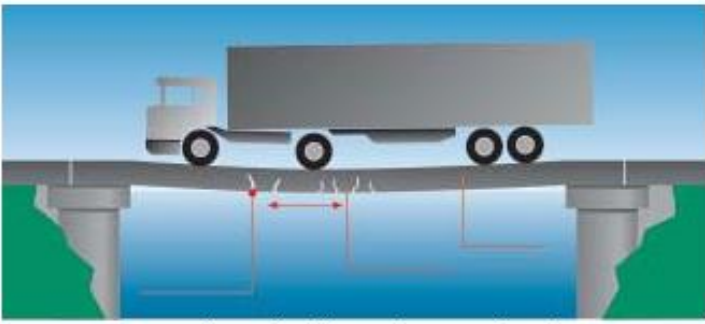
Partículas de negro de fumo
cada uma mede de 20 a 50nm, mas
ocorrem aglomeradas.

Fase elipsoidal é bolsão de água na borracha

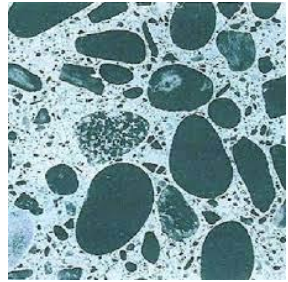
Exemplo de CMC: concreto

- Matriz: cimento + água
- Partículas: areia e brita





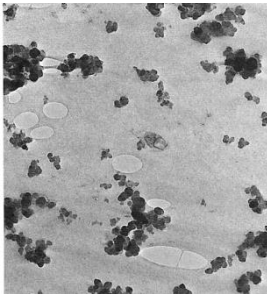
Compósitos



Reforçado com partículas

Partículas grandes

Reforçado por dispersão



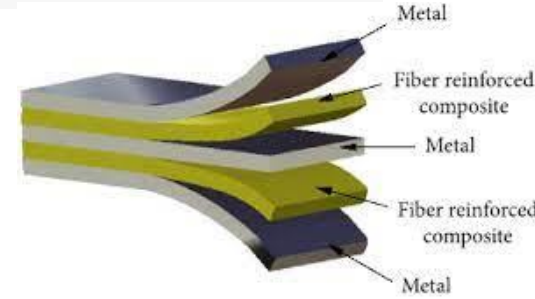
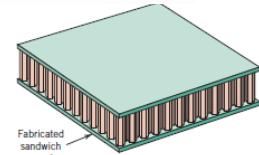
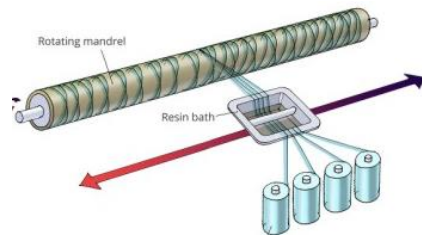
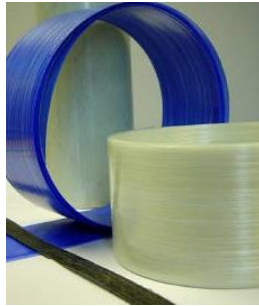
Reforçado com fibras

Contínuo (alinhado)

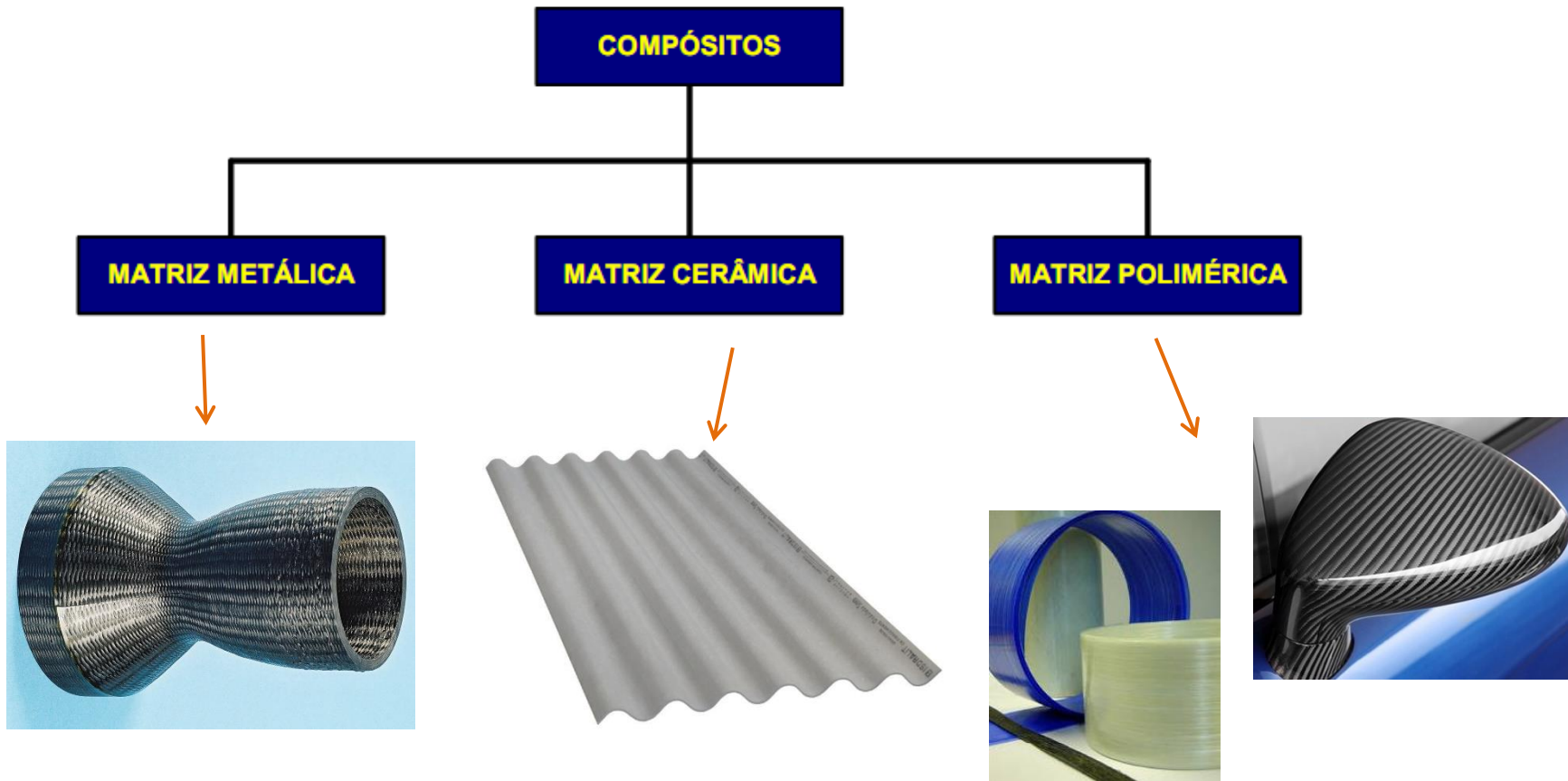
Descontínuo (curto)

Alinhado

Orientado aleatoriamente



Tipos de Materiais Compósitos



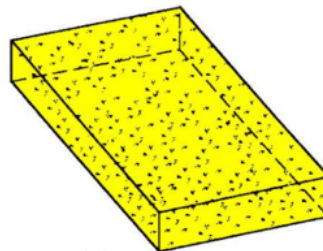
Compósitos reforçados com fibras

Constituição do compósito: {
Fase contínua (matriz)
Fase dispersa (carga)

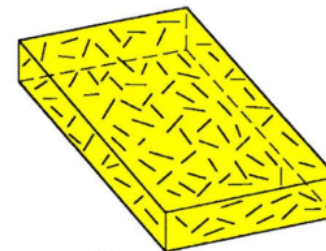
Função da matriz:

- Distribuir e transferir as tensões para a carga;
- Ligar a carga uma com as outras;
- Proteger a superfície da carga.

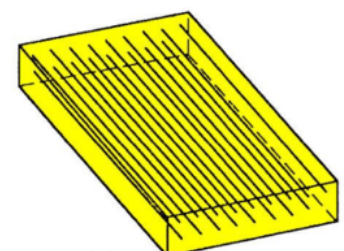
Tipos de carga: {
Reforço
Enchimento



(a)



(b)

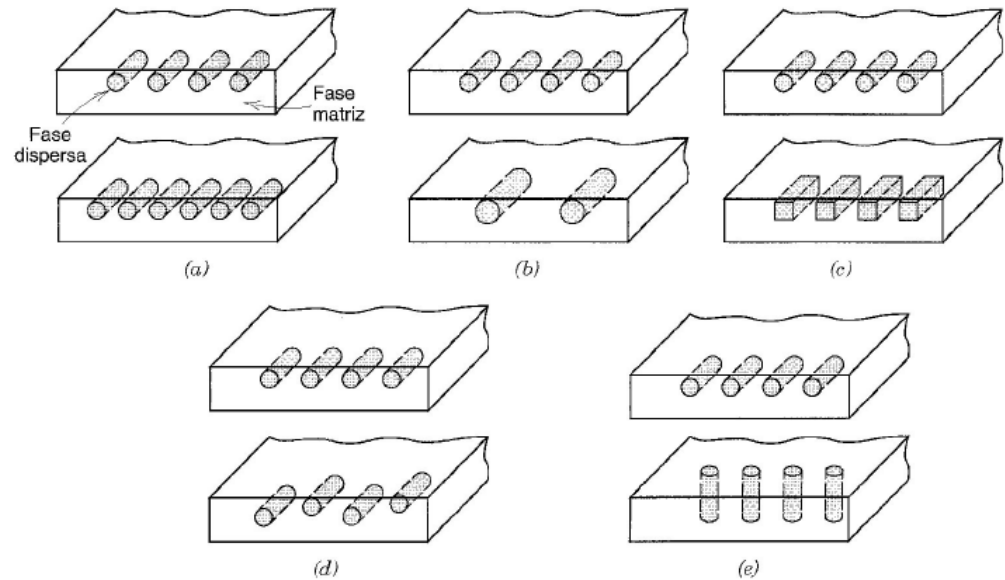


(c)

Compósitos reforçados com fibras

- Propriedades dependem da geometria da fase dispersa

- Concentração (a)
- Tamanho (b)
- Forma (c)
- Distribuição (d)
- Orientação (e)

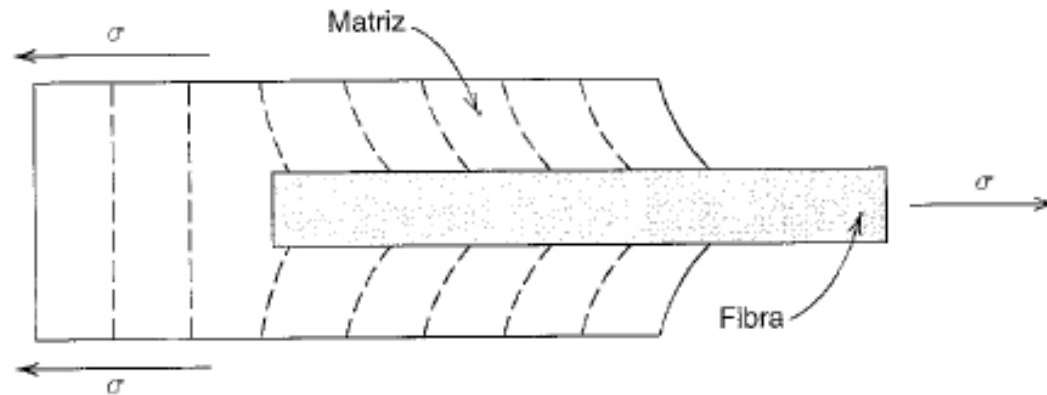


Compósitos reforçados com fibras

- São os mais comuns.
- Vantagem é alta resistência ou alta rigidez da fibra, aliado a baixa densidade da matriz.
 - Resistência a tração σ_f
 - Módulo de elasticidade E
 - Densidade relativa d
 - Resistência específica σ_f/d
 - Módulo específico E/d

Compósitos reforçados com fibras

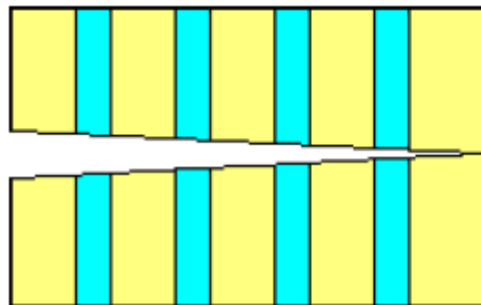
Resistência depende do quanto a carga é transferida para a fibra
Ligação interfacial entre fibra e matriz cessa na ponta da fibra,
Deformando a matriz naquela região.



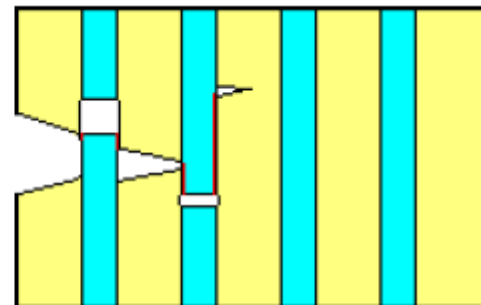
Compósitos reforçados com fibras

Compósitos reforçados com fibras requerem uma adesão moderada entre matriz e fibra :

- uma alta adesão entre as duas fases confere boa resistência mecânica pela transferência eficiente de carga da matriz para as fibras, porém o material torna-se frágil.
- uma baixa adesão resulta em baixa resistência mecânica, mas a energia absorvida na fratura (tópico 3) aumenta por dissipação de energia durante o processo de descolamento da fibra (puxamento da fibra – fiber pullout)

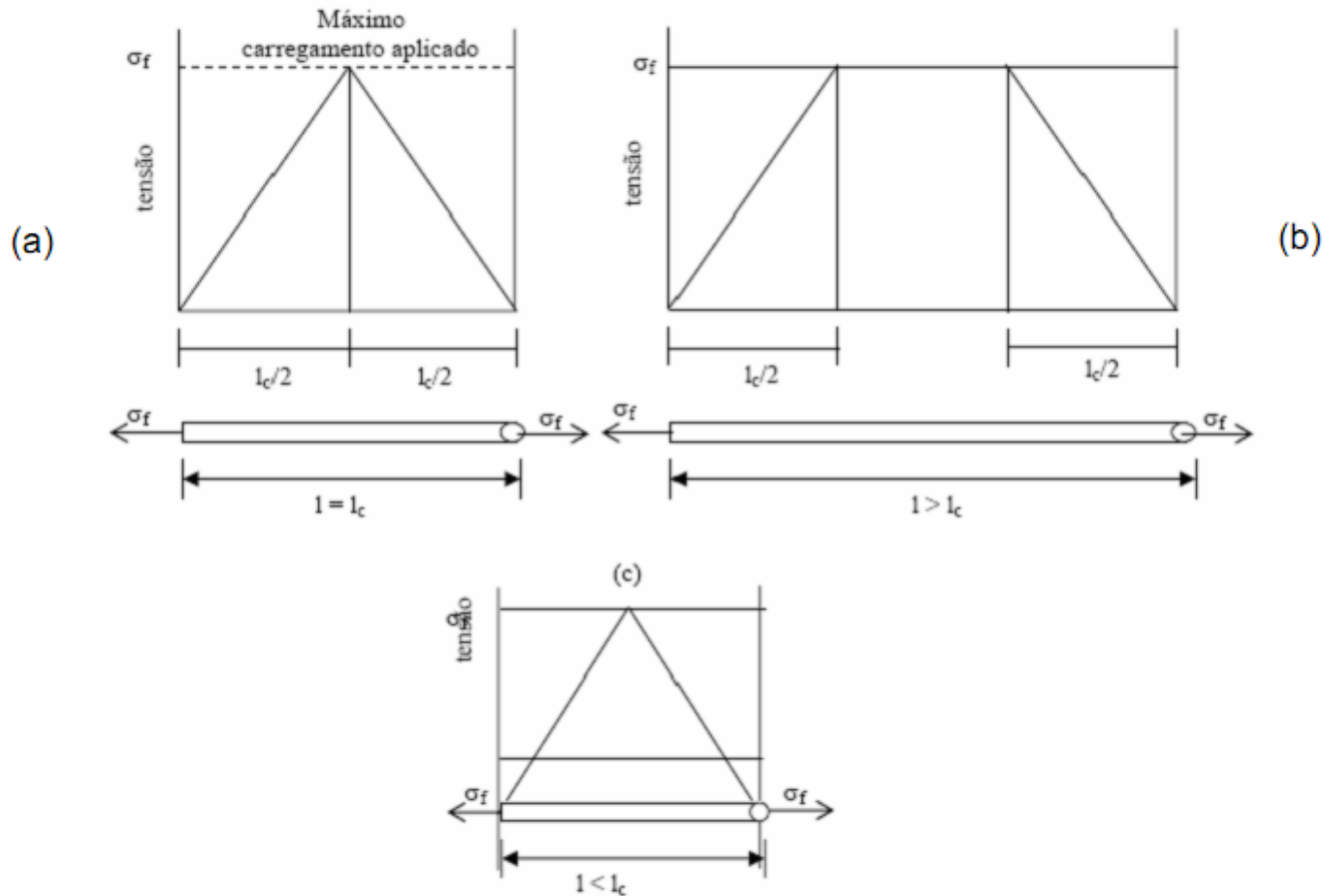


alta adesão



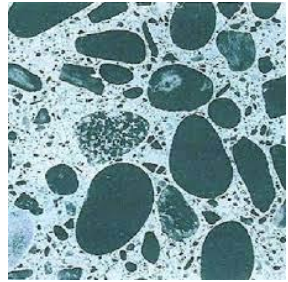
baixa adesão

Comprimento crítico de fibra



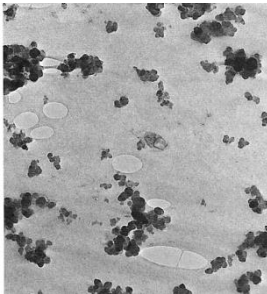
Curvas de tensão x posição quando o comprimento da fibra é: (a) igual ao comprimento crítico, (b) maior do que o comprimento crítico e (c) menor do que o comprimento crítico para um compósito reforçado com fibras que esteja submetido a uma tensão de tração igual ao limite de resistência à tração da fibra.

Compósitos

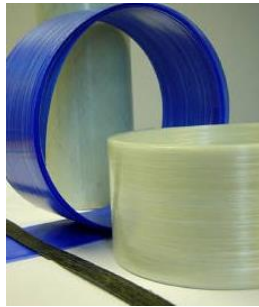


Reforçado com partículas

Partículas grandes

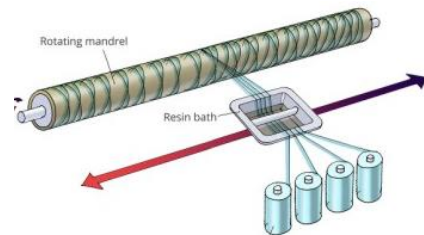


Reforçado por dispersão



Reforçado com fibras

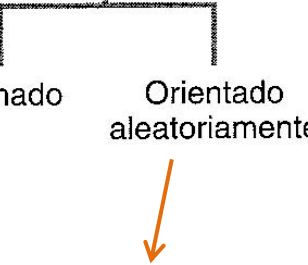
Contínuo (alinhado)



Alinhado



Orientado aleatoriamente



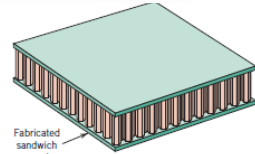
Descontínuo (curto)

Estrutural

Laminados



Painéis em sanduíche



Metal

Fiber reinforced composite

Metal

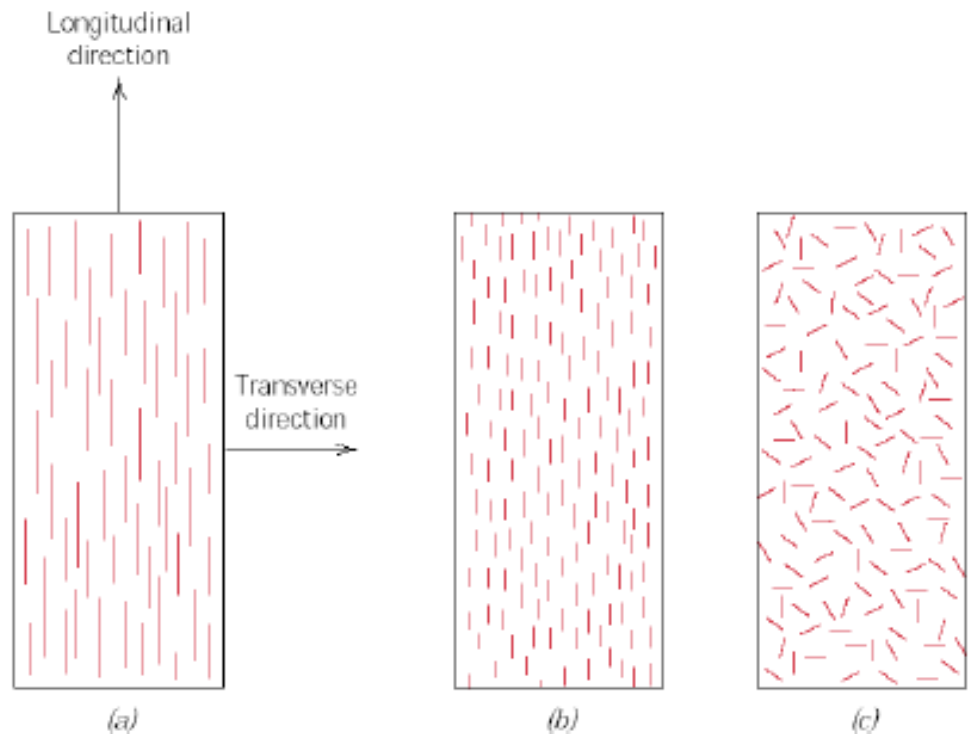
Fiber reinforced composite

Metal



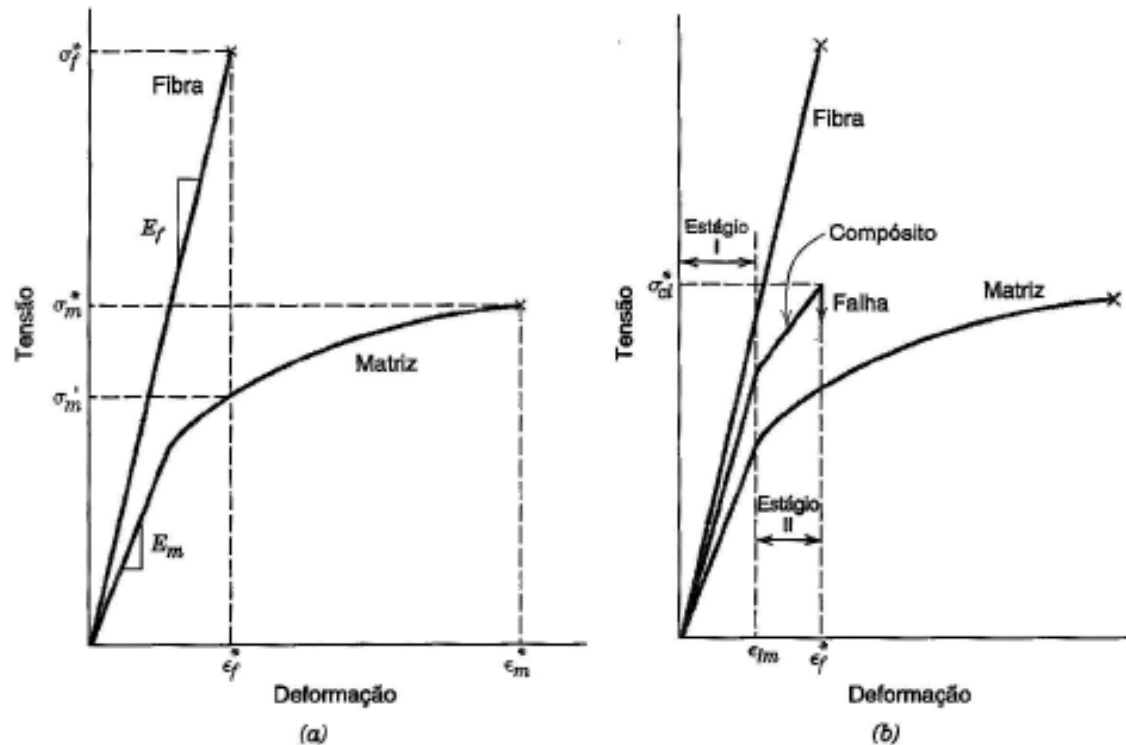
Fibras contínuas

- Quando o processo de fabricação garante que as fibras fiquem alinhadas, surge a **anisotropia** das propriedades:
- Propriedades dependem da direção em que aplico carga, em relação à direção das fibras



Fibra curta: alinhada ou aleatória

Carregamento longitudinal em fibras contínuas e alinhadas



Estágio I: fibra e matriz escoam elasticamente
Estágio II: matriz entra em regime plástico.
Falha em ϵ_f^* mas pode não ser catastrófico

Cálculo de E do compósito,

para carregamento longitudinal

$$E_c(l) = E_m V_m + E_f V_f$$

Para carregamento na transversal

$$E_c(t) = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m}$$

Processamento de compósitos reforçados com fibras

**Pultrusão: produtos longos e seção transversal constante.
mechas de fibras
Usado com fibras de vidro, carbono e aramidas
concentração entre 40 e 70% fibras**

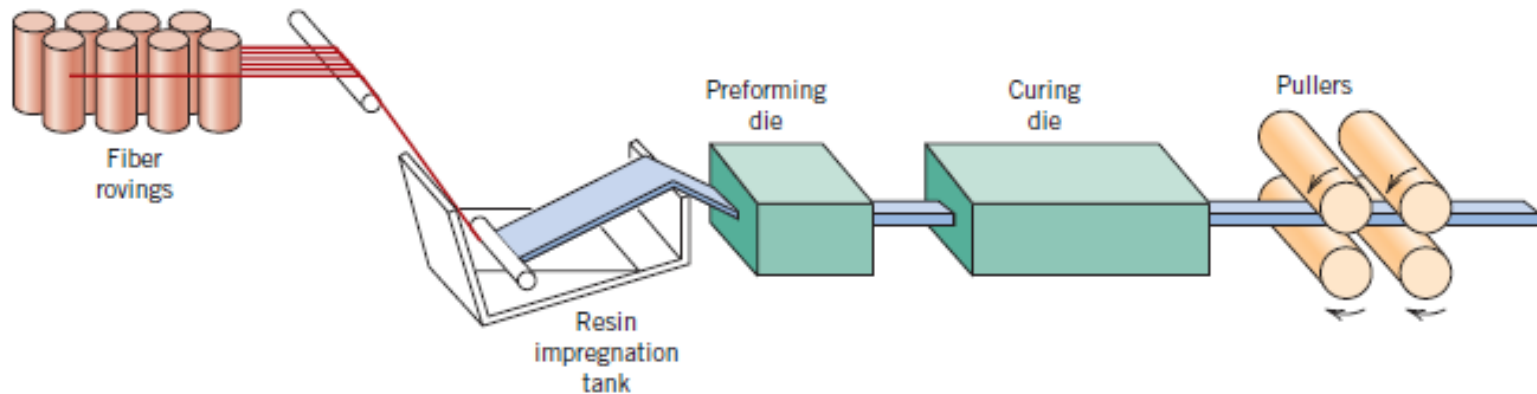
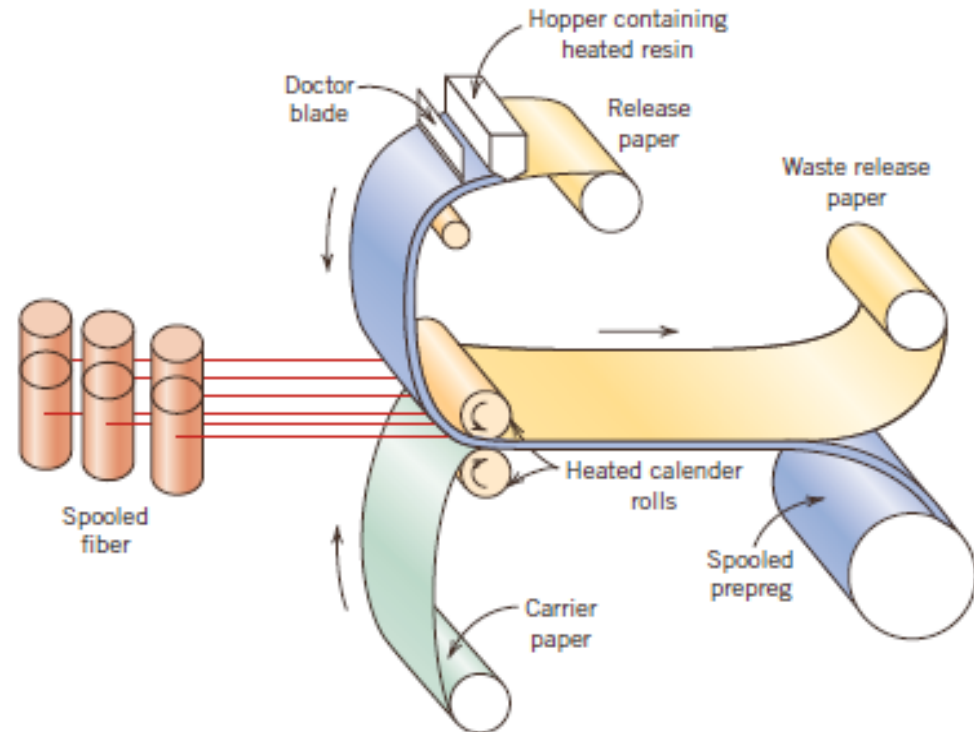


Figure 16.13 Schematic diagram showing the pultrusion process.

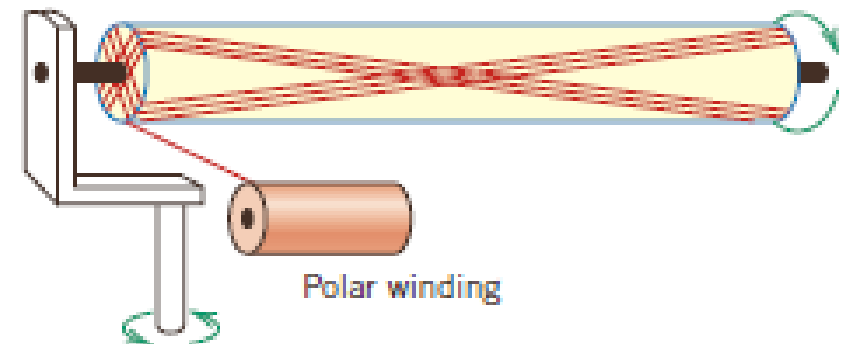
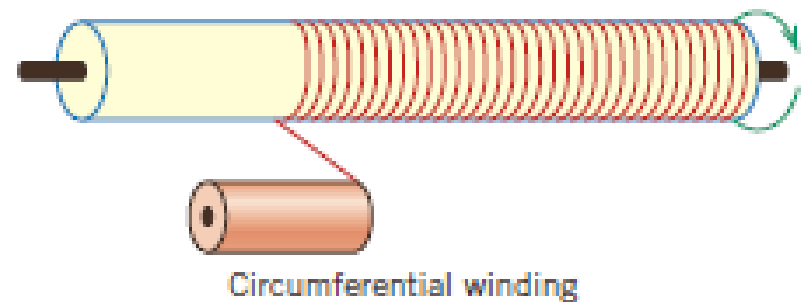
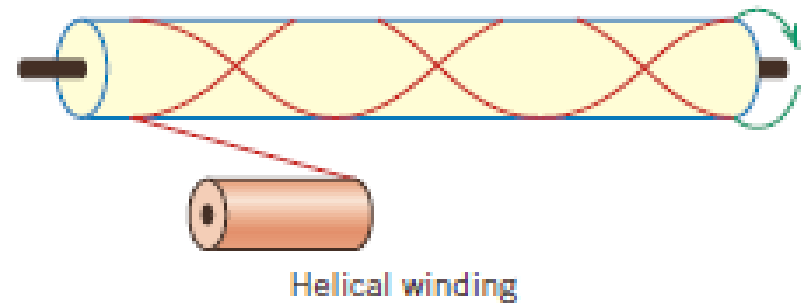
Processamento dos compósitos reforçados com fibras

- Prepreg: Processo mais utilizado para estruturas.
- Fibras contínuas pré-impregnadas com resina polimérica parcialmente curadas em espessuras de 0,08mm a 0,25 mm e larguras de 2,5 mm a 1525 mm.
- Esse material é enviado ao fabricante em forma de fita. Essa fita molda e cura por completo o produto sem a necessidade de adicionar qualquer resina adicional apenas com calor e pressão.
- Teor de resina: 35 a 45 % em vol. termofixa ou termoplástica.
- O prepreg deve ser mantido a 0 C pois a cura prosseguiria à temperatura ambiente
- Após a remoção do papel de suporte várias camadas são colocadas, em geral com as fibras cruzadas para se ter mesma resistência nos dois sentidos

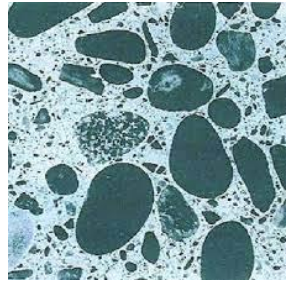


Processamento dos compósitos reforçados com fibras

- Enrolamento de filamento: Processo no qual as fibras de reforço contínuas são posicionadas segundo um padrão pré-determinado para compor uma forma oca geralmente cilíndrica
- Fios individuais ou em mechas são alimentados através de um banho de resinas e em seguida enroladas continuamente ao redor de um mandril (processo automático).
- Após um número apropriado de camadas a cura é executada em um forno ou a temperatura ambiente após a retirada do mandril.
- Como alternativa pode-se enrolar preregs estreitos e delgados (até 10 mm) ao redor do mandril.

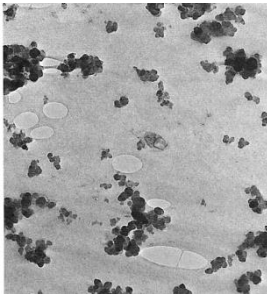


Compósitos



Reforçado com partículas

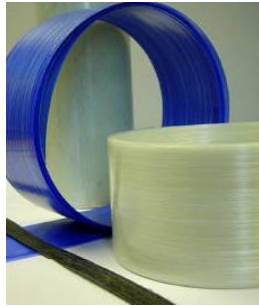
Partículas grandes



Reforçado por dispersão

Reforçado com fibras

Contínuo (alinhado)



Descontínuo (curto)

Alinhado

Orientado aleatoriamente

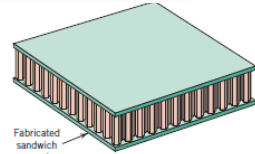


Estrutural

Laminados



Painéis em sanduíche



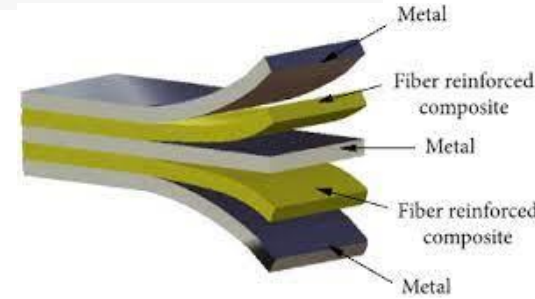
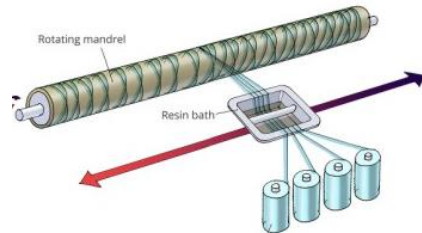
Metal

Fiber reinforced composite

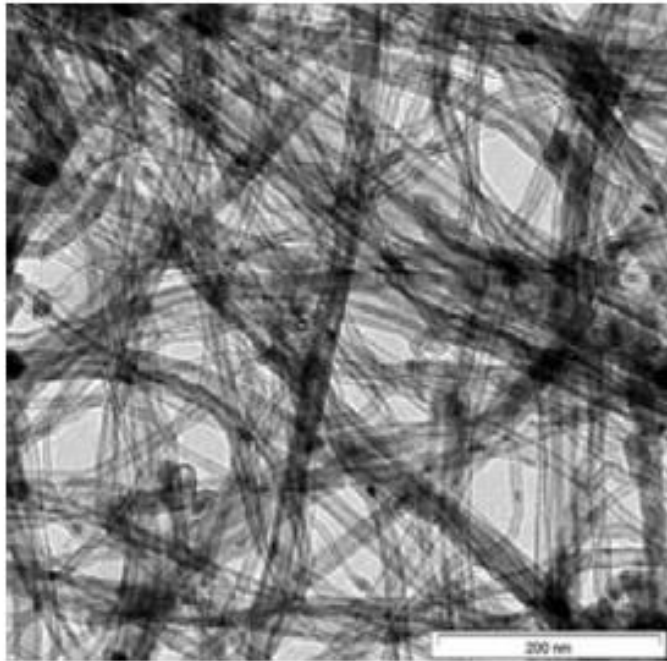
Metal

Fiber reinforced composite

Metal



Compósitos reforçados com fibras



Matriz: Nylon-6
Reforço: nanotubos de carbono
(em desenvolvimento,
condutividade térmica, resist. mecânica)



Matriz: Nylon-6,6 + SEBS-g-MA
Reforço: fibra de vidro
(aplicação automobilística)

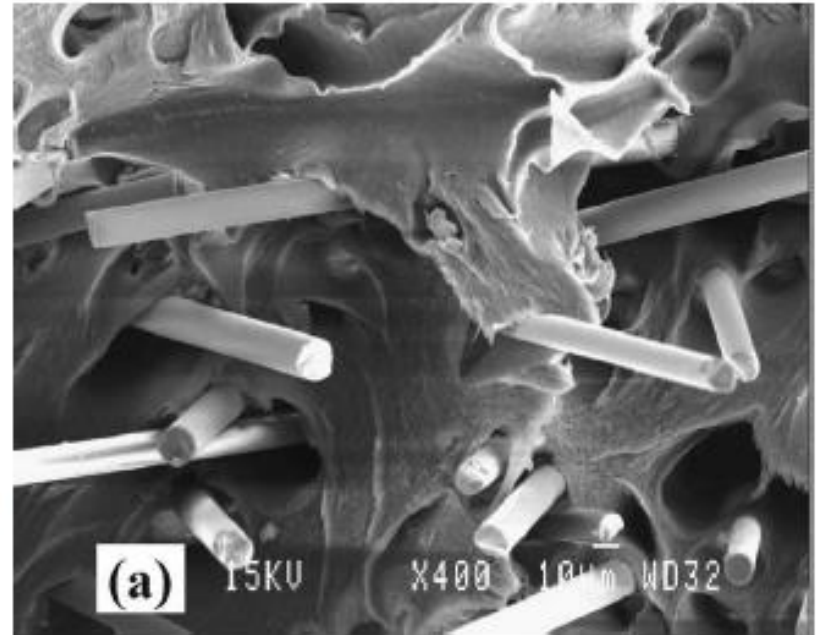


Table 16.4 Characteristics of Several Fiber-Reinforcement Materials

<i>Material</i>	<i>Specific Gravity</i>	<i>Tensile Strength</i> [GPa (10 ⁶ psi)]	<i>Specific Strength</i> (GPa)	<i>Modulus of Elasticity</i> [GPa (10 ⁶ psi)]	<i>Specific Modulus</i> (GPa)
<i>Whiskers</i>					
Graphite	2.2	20 (3)	9.1	700 (100)	318
Silicon nitride	3.2	5–7 (0.75–1.0)	1.56–2.2	350–380 (50–55)	109–118
Aluminum oxide	4.0	10–20 (1–3)	2.5–5.0	700–1500 (100–220)	175–375
Silicon carbide	3.2	20 (3)	6.25	480 (70)	150
<i>Fibers</i>					
Aluminum oxide	3.95	1.38 (0.2)	0.35	379 (55)	96
Aramid (Kevlar 49™)	1.44	3.6–4.1 (0.525–0.600)	2.5–2.85	131 (19)	91
Carbon ^a	1.78–2.15	1.5–4.8 (0.22–0.70)	0.70–2.70	228–724 (32–100)	106–407
E-glass	2.58	3.45 (0.5)	1.34	72.5 (10.5)	28.1
Boron	2.57	3.6 (0.52)	1.40	400 (60)	156
Silicon carbide	3.0	3.9 (0.57)	1.30	400 (60)	133
UHMWPE (Spectra 900™)	0.97	2.6 (0.38)	2.68	117 (17)	121
<i>Metallic Wires</i>					
High-strength steel	7.9	2.39 (0.35)	0.30	210 (30)	26.6
Molybdenum	10.2	2.2 (0.32)	0.22	324 (47)	31.8
Tungsten	19.3	2.89 (0.42)	0.15	407 (59)	21.1

Compósitos com matriz polimérica

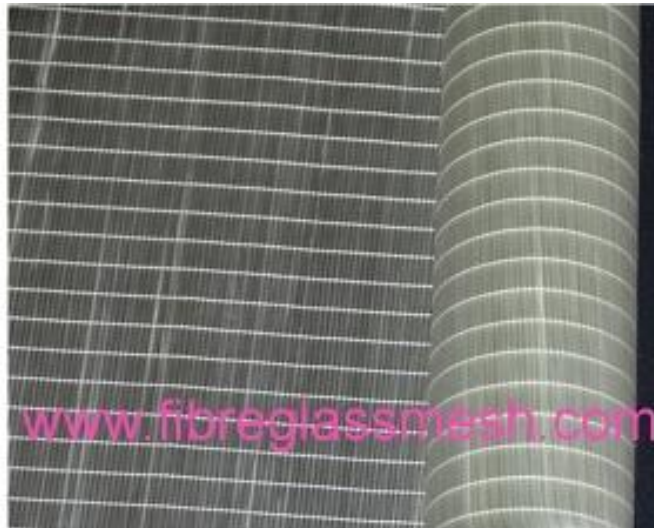
- Matrizes:
 - Termorrígidas: Poliésteres e vinil-ésteres, Epóxi, fenólicas
 - Termoplásticas: PA, PEEK, PPS, PEI
 - (poliamida, polieteretercetona, poli(sulfeto de fenileno), Polieterimida)
- Reforços
 - fibra de vidro (GFRP)
 - fibra de carbono (CFRP)
 - fibras aramidas (poliamidas)

Algumas propriedades das resinas de poliéster e epoxídicas		
	poliéster	epoxídicas
- Resistência à tração, MPa	40-90	55-130
- Módulo de elasticidade, GPa	2,0-4,4	2,8-4,2
- Resistência à flexão, MPa	60-160	125
- Resistência ao impacto, J/m	10,6-21,2	5,3-53
- Densidade, g/cm ³	1,10-1,46	1,2-1,3

Compósitos de fibra de vidro

- Vantagens
 - Alto σ_f^* (3500 MPa), barato, inerte
- Usos
 - Carcaças automotivas e marítimas
 - Recipientes de armazenamento
- Limitações
 - Baixa rigidez (70 GPa)
 - $T_{max} < 200^\circ \text{C}$

Compósitos de fibra de vidro



Compósitos de fibra de carbono

- Vantagens
 - Baixa densidade relativa (1,8 a 2)
 - Alto E (200 a 700GPa)
 - Retém alto E e alta σ_f em altas T.
 - Inerte a umidade e muito ácidos e solventes.
- Usos
 - Equipamento esportivo, aviação, automotivo.
- Limitações
 - custo

Fabricação da fibra de carbono

- Fibras de diâmetro 4 a 10 μ m
- Fibra contem regiões de grafita e regiões não-cristalinas.
- Produzidas a partir de precursores: rayon, poliácrlonitrila e piche.
- Processo afeta E: existem classes de E (padrão, intermediário, alto e ultra alto).



Compósitos de fibras aramida ("kevlar")

- Vantagens
 - Baixa densidade relativa (1,44)
 - Alta tenacidade
 - Dutilidade permite tecelagem
- Usos
 - Blindagem balística
 - Artigos esportivos, pneus
- Limitações
 - Susceptíveis a ácidos e bases fortes
 - Baixa resistência à compressão
 - Custo (> fibra de vidro)



Comparações entre compósitos de matriz epóxi

Table 16.5 Properties of Continuous and Aligned Glass-, Carbon-, and Aramid-Fiber Reinforced Epoxy-Matrix Composites in Longitudinal and Transverse Directions. In All Cases the Fiber Volume Fraction Is 0.60

<i>Property</i>	<i>Glass (E-glass)</i>	<i>Carbon (High Strength)</i>	<i>Aramid (Kevlar 49)</i>
Specific gravity	2.1	1.6	1.4
Tensile modulus			
Longitudinal [GPa (10^6 psi)]	45 (6.5)	145 (21)	76 (11)
Transverse [GPa (10^6 psi)]	12 (1.8)	10 (1.5)	5.5 (0.8)
Tensile strength			
Longitudinal [MPa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Transverse [MPa (ksi)]	40 (5.8)	41 (6)	30 (4.3)
Ultimate tensile strain			
Longitudinal	2.3	0.9	1.8
Transverse	0.4	0.4	0.5

Source: Adapted from R. F. Floral and S. T. Peters, "Composite Structures and Technologies," tutorial notes, 1989.

Fibras Vegetais

Fibra	Diâmetro (μm)	Densidade (g/cm^3)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Algodão	16 – 21	1,5 – 1,6	287 – 597	5,5 – 12,6	7 – 8
Juta	200	1,3	393 – 773	26,5	1,5 – 1,8
Linho	---	1,5	345 – 1035	27,6	2,7 – 3,2
Cânhamo	---	---	690	---	1,6
Rami	---	1,5	400 – 938	61,4 – 128	3,6 – 3,8
Sisal	50 - 300	1,45	511 – 635	9,4 – 22	3 - 7
Coco	100 - 450	1,15 – 1,45	131 - 175	4 – 13	15 - 40
Vidro – E	8 - 14	2,5	2000 - 3500	70	1,8 – 3,2
Vidro – S	10	2,5	4590	86	5,7
Kevlar-49	12	1,48	2800 – 3792	131	2,2 – 2,8
Carbono	7 - 10	1,6 – 1,9	4000	230 – 240	1,4 – 1,8

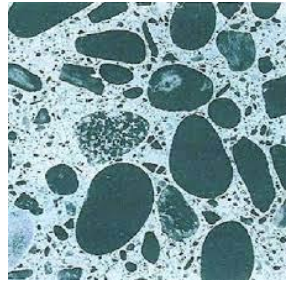


Agência Fapesp

Carcaça de um ventilador reforçada com fibras de linho (vol. 21% linho),
obtida pelo processo SMC (*Sheet Moulding Compound*)

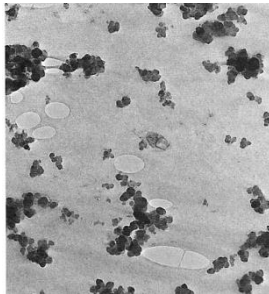


Compósitos

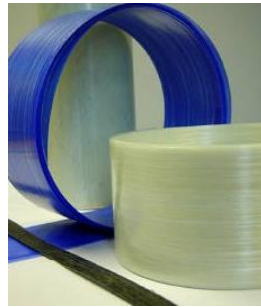


Reforçado com partículas

Partículas grandes

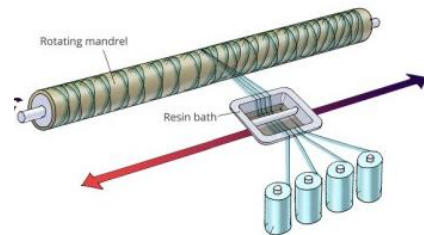


Reforçado por dispersão



Reforçado com fibras

Contínuo (alinhado)



Descontínuo (curto)

Alinhado

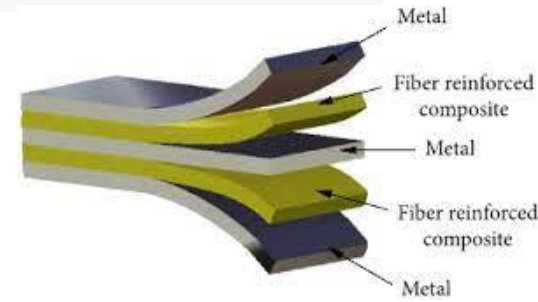
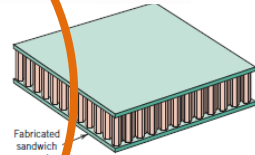
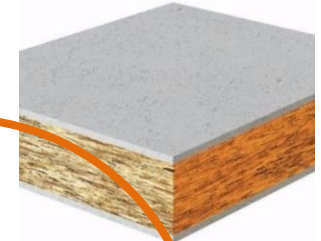
Orientado aleatoriamente



Estrutural

Laminados

Painéis em sanduíche



Compósitos estruturais sanduíche

- Painéis em forma de sanduíches: Duas folhas externas mais resistentes separadas por uma camada de metal menos denso.
- Folhas externas: madeira compensada, alumínio e ligas, plásticos + fibras, titânio aço.
- Recheio interno: Polímeros com espuma, borrachas sintéticas, colmeias.
- Ex: Asas e fuselagem de aeronaves telhados, pisos, paredes.

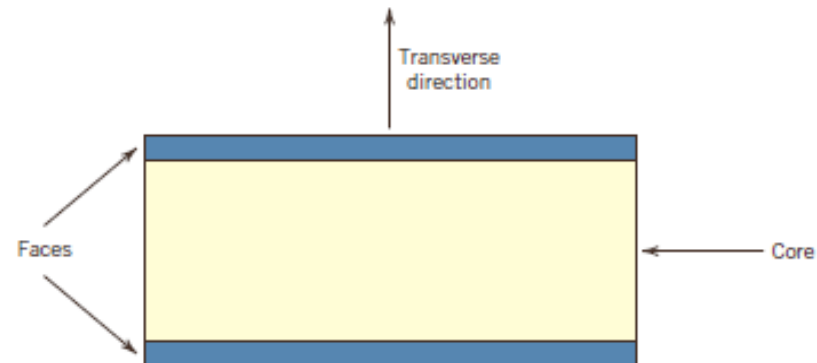


Figure 16.17 Schematic diagram showing the cross section of a sandwich panel.

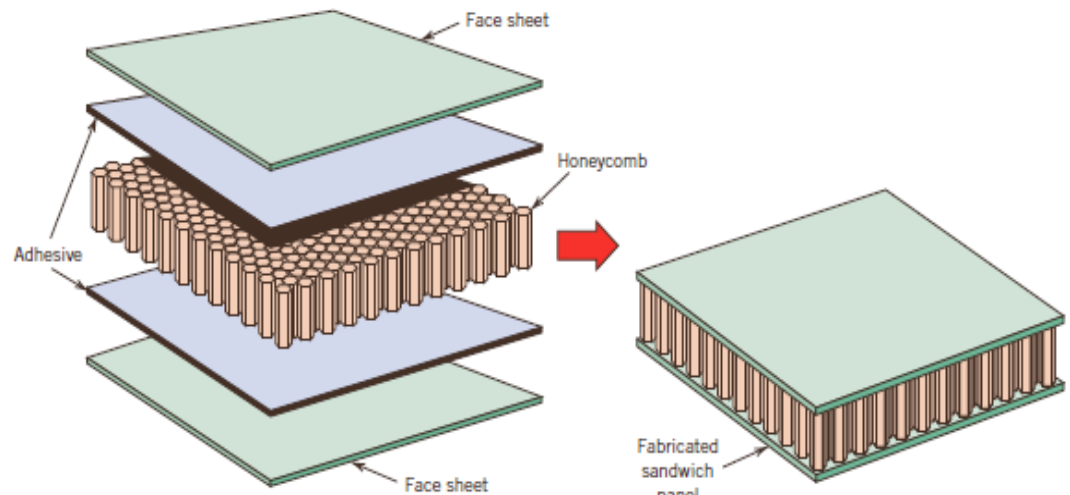
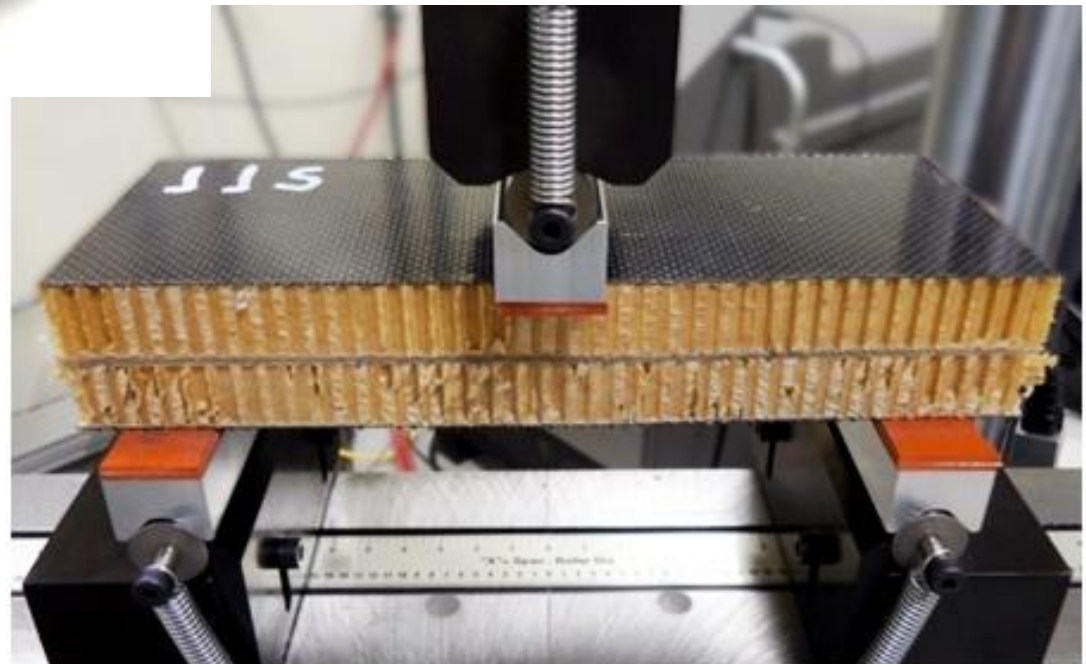
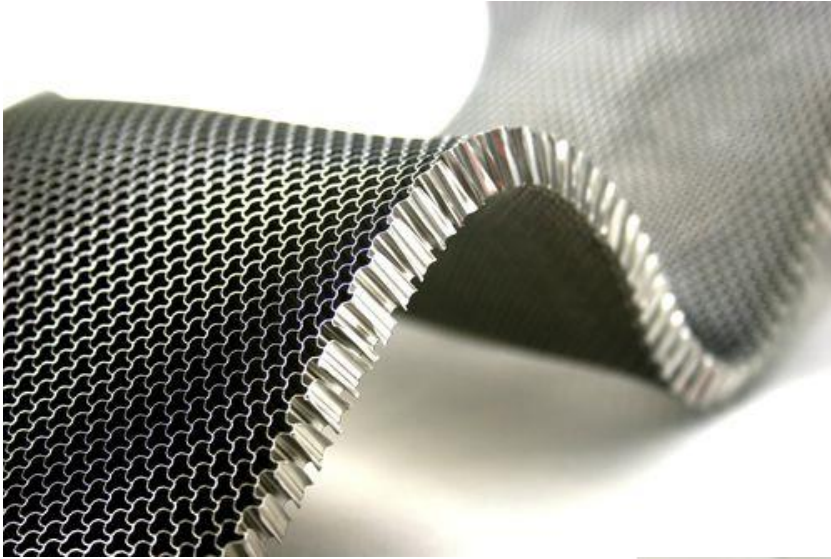


Figure 16.18 Schematic diagram showing the construction of a honeycomb core sandwich panel. (Reprinted with permission from *Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, *Composites*, ASM International, Metals Park, OH, 1987.)

Compósitos estruturais sanduíche

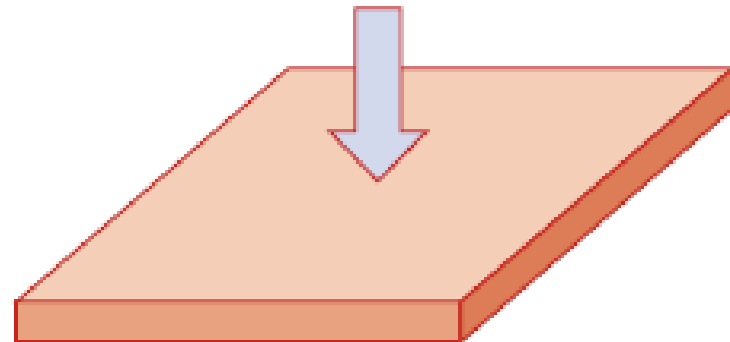
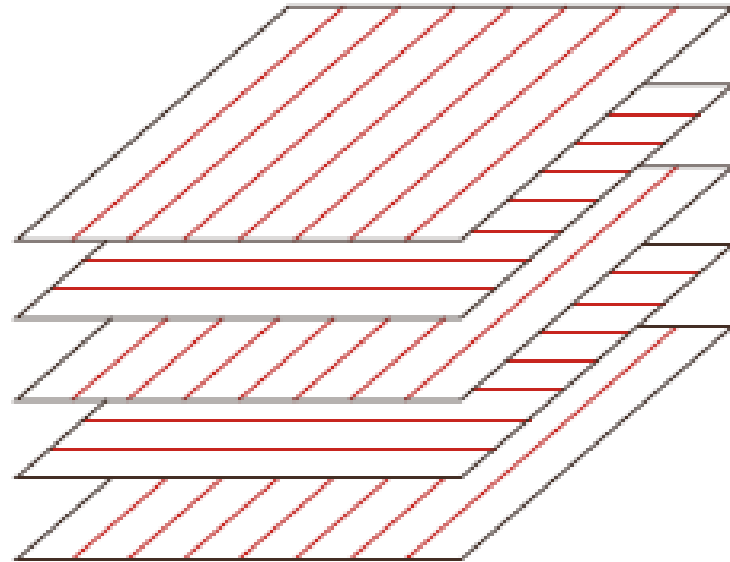


Compósitos estruturais sanduíche

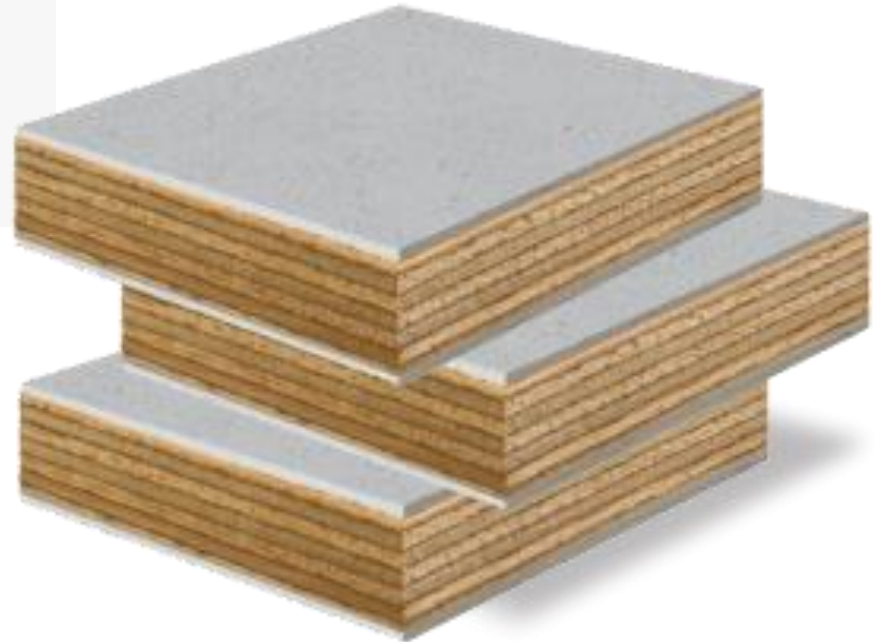


Compósitos estruturais laminares

- **Compósitos laminares:**
Folhas ou painéis bidimensionais são cimentados umas as outras invertendo a direção do alinhamento das fibras de cada placa
- Ex: Esqui moderno



Compósitos estruturais laminares



Processamento de compósitos